

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta Strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie



# Návrh technologie výroby chladičích drážek

## Design of Cooling Grooves Production Technology.

Student: Martin Otáhal

Osobní číslo: OTA0027

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Antonín Trefil Ph.D.

Ostrava 2020

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....

Podpis studenta

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Martin Otáhal**

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Návrh technologie výroby chladících drážek  
Design of Cooling Grooves Production Technology

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor výroby.
3. Návrh technologie výroby.
4. Technicko-ekonomické vyhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

SADÍLEK, M. *CAM systémy v obrábění I. - II. doplněné vydání*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010. 138 s. ISBN 978-80-248-2278-4.

BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.

KOCMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno. 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

MRKVICA, M. *Přípravky a obráběcí nástroje: I. díl, Řezné nástroje*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2006. ISBN 80-7078-941-7.


MRKVICA, M. *Přípravky a obráběcí nástroje: II. díl, Přípravky*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava. 1991.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

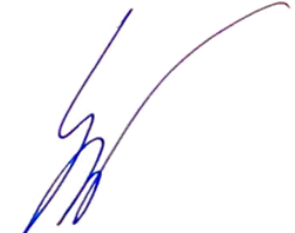
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Antonín Trefil, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Antonínu Trefilovi Ph.D. za odborné konzultace, připomínky a pomoc při zpracování. Také velmi oceňuji jeho snahu a ochotu při konzultacích nad rámec domluv.

## **Anotace**

Otáhal, M. Návrh technologie výroby chladících drážek: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojů, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 54 s. Vedoucí práce: Trefil A.

Bakalářská práce se zabývá technologií výroby chladících drážek pro přívod vzduchu na těle rotační formy s rozdílnými průměry. Velký důraz je kladen na přesné umístění chladících drážek a konstantní hloubku drážky v celé její délce. Hlavním cílem této práce je inovovat a zefektivnit postup výroby. Stanovit alternativní metody výroby a upnutí. Práce je ztížena tím, že materiál formy je ocel třídy 19 a šířka drážky je velmi malá. Součást je frézována na pěti osé CNC frézce z důvodu naklápění součásti po celé délce drážky a zajištění tak nejvhodnější pozice pro opracování kulovou frézou.

## **Annotation**

Otáhal M. Design of Cooling Grooves Production Technology, bachelor thesis. Ostrava: Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 54 p. Thesis head: Trefil A.

The bachelor thesis examines the technology of cooling grooves manufacture. The cooling grooves serve to air supply a body of different diameters. The emphasis is on the precise positioning of the cooling grooves with a constant depth in full length. The major goal of this bachelor thesis is to innovate and streamline the production process. In addition, we want to determine other possible manufacture process methods and it's clumping in contrast with the default manufacture method. The bachelor thesis is more difficult in terms of used material. In our case, we use metal of grade 19 witch consists of small-scale grooves. Our component is milled by a five-axis CNC mill. We choose this mill due tilting of components in full lenght of the groove to cover the most suitable position for machining with a ball end mill.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	8
1. Úvod .....	9
1.1 Formy pro výrobu ráfků .....	9
2. Teoretický rozbor výroby .....	12
2.1 Forma a její popis .....	12
2.2 Materiál formy .....	13
2.2.1 Obrobitelnost materiálu forem a volba řezného materiálu .....	14
2.3 Návrh výrobního stroje .....	16
2.4 Volba upnutí .....	17
2.5 Měření drážek .....	20
2.5.1 Porovnávání pomocí rádiusové šablony .....	21
2.5.2 Měření pomocí obrobkové sondy .....	23
2.5.3 Souřadnicový měřicí stroj .....	23
2.6 Problematiky výroby .....	24
3. Návrh technologie výroby .....	26
3.1 Volba stroje .....	26
3.1.1 Strategie pěti osého frézování na CNC .....	28
3.2 Zvolené upnutí .....	31
3.3 Volba nástroje a řezných podmínek .....	32
3.3.1 Řezné podmínky při frézování .....	38
3.3.2 Trvanlivost a životnost nástroje .....	39
3.4 Metoda měření .....	42
4. Technicko-ekonomické vyhodnocení .....	43
4.1 Čas výroby nebo renovace chladících drážek .....	43
4.2 Náklady na výrobu a renovaci chladících drážek .....	45
4.2.1 Náklady na výrobu přípravku .....	46
4.3 Cena a volba nástrojů .....	47
4.4 Možné zefektivnění výroby .....	49
5. Závěr .....	51

## Seznam použitých zkratk a symbolů

E	Youngův modul.....	[MPa]
HB	zkouška tvrdosti podle Brinella.....	[-]
HRC	zkouška tvrdosti podle Rockwella .....	[-]
PVD	„nanášení odpařením z pevné fáze“.....	[-]
R	rádus.....	[mm]
T	čas.....	[min]
T <sub>1-5</sub>	výrobní čas drážky 1 – 5.....	[min]
VBD	vyměnitelná břitová destička.....	[-]
a <sub>p</sub>	hloubka řezu .....	[mm]
d <sub>1</sub>	funkční průměr frézy .....	[mm]
d <sub>2</sub>	průměr upínací částí.....	[mm]
d <sub>eff</sub>	efektivní průměr frézy .....	[mm]
f <sub>min</sub>	posuv za minutu.....	[mm · min <sup>-1</sup> ]
f <sub>ot</sub>	posuv za otáčku.....	[mm]
f <sub>z</sub>	posuv na zub .....	[mm]
l <sub>1</sub>	délka nástroje.....	[mm]
l <sub>2</sub>	délka výbrusu.....	[mm]
l <sub>3</sub>	funkční délka .....	[mm]
n	otáčky.....	[min <sup>-1</sup> ]
s <sub>o</sub>	posuv pro příjezd/odjezd.....	[mm · min <sup>-1</sup> ]
v <sub>c</sub>	řezná rychlost.....	[m · min <sup>-1</sup> ]
v <sub>f</sub>	posuv stolu.....	[mm · min <sup>-1</sup> ]
z	počet zubů.....	[-]
β <sub>f</sub>	úhel náklonu nástroje.....	[°]



# 1. Úvod

Formy jsou pro náš průmysl důležitou součástí, bez které se nelze obejít. Usnadňují složité a technologicky náročné výrobní metody. Díky formám jsme schopni navýšit výrobní možnosti firmy s úsporou materiálu a tím dosáhnout lepšího ekonomického výsledku. Při výrobě forem jsou často používány kvalitní oceli, a proto je nutné dbát na jejich obrobitelnost, se kterou souvisí i volba nástrojů a technologie výroby.

Bakalářské práce se zabývá obráběním chladících drážek na vnější straně formy. Chladicí drážky napomáhají „odlepení“ formy od formované slitiny hliníku a jsou frézovány do oceli o tvrdosti 49-53 HRC. Tvrdosti se dosahuje pomocí kalení, po kterém následuje třískové obrábění. Pro obrábění je cílem navržení nejvhodnějšího stroje. Z důvodu velikosti 17" je omezeno použití některých technologií a menších obráběcích strojů. Velikost drážky  $R = 1 \text{ mm}$  znesnadňuje možnost měření. Velikost formy přináší složité upnutí, ale i zde jsou navrženy alternativní metody v závislosti na počtu obráběných kusů a možnostech výběru.

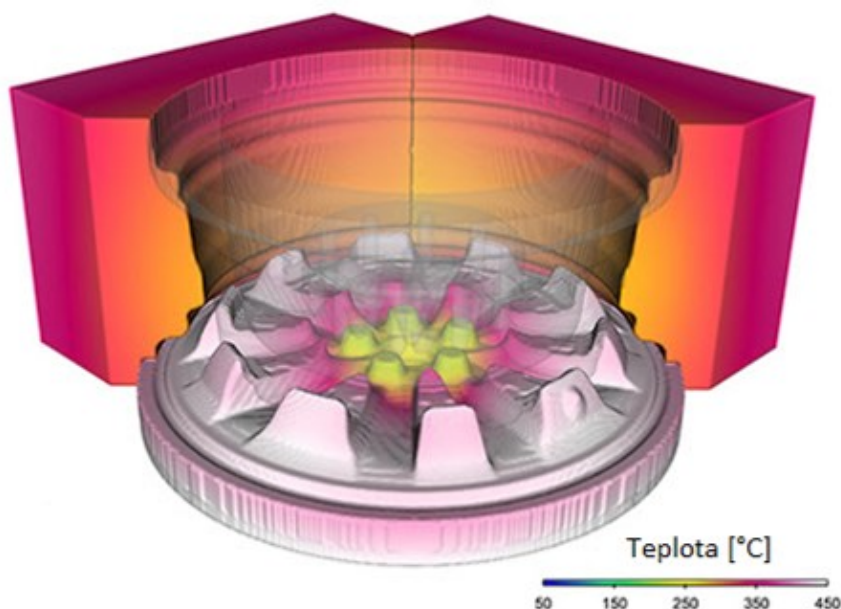
Obrábění tvrdých materiálů vyžaduje kvalitní nástroje, které převyšují svojí tvrdostí obráběný materiál. Volba nástroje je doplněna o technologii frézování při naklápění formy během řezného procesu, což pozitivně ovlivňuje nejenom životnost nástroje. Závěrem je stanovení ekonomičnosti výroby a doporučení pro příští možné úpravy.

## 1.1 Formy pro výrobu ráfků

Díly forem jsou nejčastěji vyráběny z ocelí. Musí splňovat kritéria jako například stálost rozměrů, houževnatost a pevnost za vyšších teplot nebo velkou tepelnou vodivost. V materiálu je nutná stejnorodá struktura, čehož se docílí teplem zpracováním. Formy pro tlakové lití se skládají z hlavních dvou částí. První polovina formy je pevná a druhá pohyblivá. Dále mohou být doplněny jádrem, pevnou a pohyblivou vložkou, plnicí komorou nebo vyhazovačem. Obrázek č. 1 představuje výrobu ráfků metodou nízkotlakého lití.<sup>1</sup>

Po odlití jednotlivých dílů formy a očištění, musí projít přes proces tepelného zpracování. Tepelným zpracováním docílíme stejnorodé struktury a odstraníme vnitřní napětí v materiálu vzniklé během obrábění. Po tepelném zpracování následuje třískové opracování, kterým forma dostává požadovaný rozměr a tvar. Obtížnost obrobení plochy spočívá ve vysoké tvrdosti povrchu po zakalení. Posledním krokem po třískovém obrobení je popouštění, které probíhá v závislosti na materiálu od 350-620 °C a po dobu 5-7 hodin. Forma je poté využívána pro výrobu litých kol ze slitiny hliníku. Výroba litých kol je prováděna nízkotlakým litím, čímž se formuje slitina hliníku podle formy do požadovaného tvaru. Forma pro výrobu ráfků vydrží 50-80 tisíc použití.<sup>1</sup>

Velikost ráfku je značena v anglických palcích 1"=25,4 mm. Každý hliníkový ráfek je označen průměrem, šířkou, roztečí a počtem děr. Hliníkové ráfky mají oproti levější verzi z oceli spoustu výhod. Hlavní a nespornou výhodou je atraktivita, která přidá na vzhledu celého automobilu. Další výhodou hliníkových ráfků je lepší chlazení brzd. Díky většímu prostoru mezi paprsky ráfku je lepší přívod vzduchu a odvod tepla z místa brzdových destiček. Lepší přívod vzduchu způsobí chladnější brzdovou sestavu, čímž dosáhneme vyšší životnosti jak brzdové sestavy, tak pneumatik. V dražších slitinách hliníku jsou příměsi manganu a hořčíku, které napomáhají vyšší odolnosti proti poškození a nárazu. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena.<sup>1</sup>



Obrázek č. 1 – Forma pro nízkotlaké lití<sup>21</sup>

## Nízkotlaké lití

Metoda nízkotlakého lití představuje proces, během kterého je tavenina vytlačována z udržovací pece keramickou trubicí vzhůru do dutiny samotné lící formy. Při procesu je využíváno principu podtlaku. Na hladinu taveniny působí přetlak, díky kterému je tavenina plynule natlačována do formy. Rychlost plnění je okolo  $0,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  při maximální tlaku 300 MPa. Metoda nízkotlakého lití je nejčastěji používána pro slitiny hliníku. Velkou výhodou představuje vysoké procento využití taveniny, malá zátěž na ekologii a možnost automatizace.<sup>2</sup>

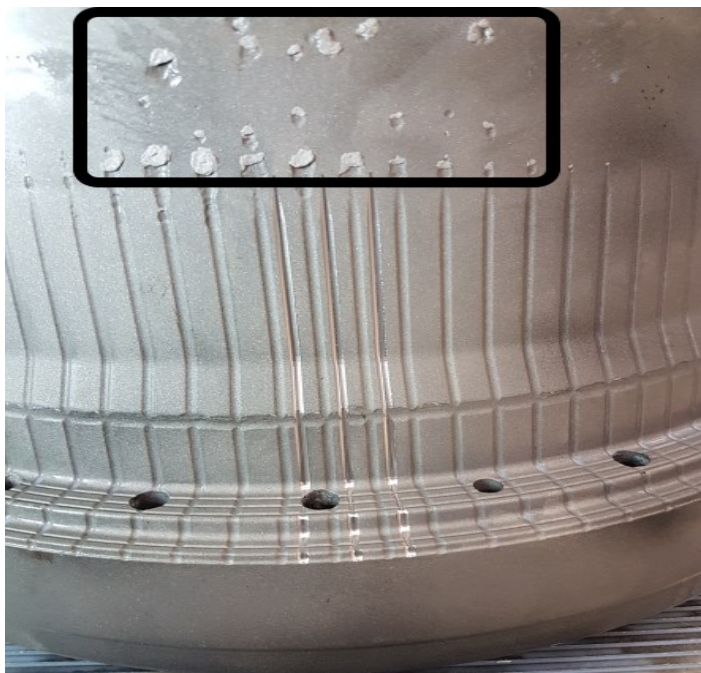
## 2. Teoretický rozbor výroby

První kapitola se v první polovině věnuje přiblížení forem a materiálu pro výrobu. V následných bodech je popsáno obrábění drážek z její vnější strany, popis a návrh výrobního stroje. Následně je popsáno upnutí pomocí upínek nebo kombinací s přípravkem. Jsou zde uvedeny i případné výhody a nevýhody jednotlivých způsobů upnutí. Dále se kapitola zabývá návrhem možností měření a jejich popisem. Měření rádiusů je problematickou a zdlouhavou částí z důvodu malého rozměru. Závěrem kapitoly je rozebrána problematika výroby s ukázkou poškozených míst určených k renovaci viz. Obrázek č. 2.

### 2.1 Forma a její popis

Výroba forem je velmi nákladnou záležitostí. Části formy jsou vyrobeny z nástrojové oceli. Obráběná nástrojová ocel je navíc zakalena na tvrdost 49-53 HRC, což vede k vyšším požadavkům na nástroje než například třískové obrábění běžné konstrukční oceli. Po obrobení je samozřejmě nutností popouštění a následné broušení. Broušení se provádí z důvodu zvýšení přesnosti, což celý proces dělá náročnější na výrobu a čas. Renovace forem je tedy v tomto případě vhodnou volbou, kdy není nutné znovu celý zdlouhavý proces absolvovat. Renovace je hojně využívaná především u součástí, které jsou časově zdlouhavé nebo náročné na výrobu. Není nutná výměna celé formy, ale pouze renovace poškozené části nebo částí. Díky tomu je možné ušetřit značné finanční náklady.

V méj bakalářské práci se zabývám výrobou a renovací pouze chladících drážek z vnější strany formy, která je vyrobena z materiálu W. Nr 1.2885, což je nástrojová ocel, vhodná pro pracování za vyšších teplot. Na Obrázku č. 2 jsou vyznačena místa, které je nutné renovovat. Chladící drážky, které byly vyrobeny a renovovány, slouží k „odlepení“ formy od výlisku ze slitiny hliníku, kterou forma tvarovala. I přesto, že byla forma vyrobena z kvalitnějšího materiálu, se jejím opotřebením do těla formy dostaly části hliníku, které vytvoří „krátery“ a návary. Tato místa je nutné opravit.



Obrázek č. 2 – Ulpělý hliník na formě

## Postup renovace

Poškozená místa jsou na Obrázku č. 2. První krok při renovaci je odstranění hliníku z poškozených míst. Po jeho odstranění se každý „kráter“ zavaří metodou 111 (metoda ručního svařování obalovanou elektrodou). Elektroda bývá stejného chemického složení jako základní materiál. Následně je nutné třískové opracování a obnovení drážek. Návary je potřeba nejprve osoustružit na původní rozměr. Závěrečným krokem se zabývá moje bakalářská práce, což je vyfrézování chladících drážek v místech, které byly zavařeny.

## 2.2 Materiál formy

Značení materiálu:

DIN: X32CrMoCoV3-3-3

Číslo materiálu: W.Nr1.2885

Jedná se o nástrojovou ocel obsahující kobalt. Chemické složení uvádím v Tabulce č. 1.

Materiál má zvýšenou:

- pevnost při vysoké teplotě
- odolnost proti popouštění
- odolnost proti opotřebení

Materiál je využíván pro lisování za tepla, proto se z něj vyrábí tlakové formy, disky nebo držáky zápustek. Dále se používá pro výrobu protlačovacích hlavíc pro měď a její slitiny, nebo pro vytlačovací razidla.<sup>7</sup>

Chemické složení Tabulka 1<sup>7</sup>:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	P [%]	V [%]	S [%]	Co [%]
0,28- 0,35	0,10- 0,40	0,15- 0,45	2,70- 3,20	2,60- 3,00	0,03	0,40- 0,70	0,03	2,50-3,00

## Mechanické vlastnosti:

Modul pružnosti  $E = 215\,000\text{ MPa}$

Hustota:  $7,88\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Po zakalení v oleji při teplotě 1020-1060 °C se dosahuje tvrdosti 49-53 HRC.

Tvrdost: HB 30

Materiál měl nejvyšší pevnost v tahu při 550 °C. Pevnost v tahu je udávána  $\pm 1730\text{ MPa}$ .

Pevnost v tahu značně klesá při teplotě 700 °C a více. Při teplotě 700 °C má materiál pevnost v tahu pouze 995 MPa.<sup>7</sup>

### 2.2.1 Obrobitelnost materiálu forem a volba řezného materiálu

Obrábění tvrdých materiálů se velmi rozšířilo v posledním desetiletí. Dříve byl velký problém s obráběním tvrdých materiálů z důvodu malé dostupnosti nástrojů na třískové obrábění. Materiály bylo nutné obrábět nízkými řeznými rychlostmi nebo je brousit, což bylo

neekonomické. S příchodem nových výrobních technologií nástrojů a jejich VBD je v současnosti obrábění tvrdých materiálů běžné. Při obvyklých posuvech dosahujeme stejné kvality za mnohem nižší čas. Jedná se o obrábění některých typů litin nebo legovaných a kalených ocelí.<sup>5</sup>

Materiál formy se volí podle několika hlavních hledisek:

- požadavky zákazníka,
- požadavky výrobní technologie,
- finanční náklady.

Výroba je umožněna propojením výše uvedených faktorů. Díky těmto požadavkům existuje velká škála materiálů, ze kterých se formy vyrábí. Volba materiálu se odvíjí především od účelu formy, pracovní teploty a počtu vyrobených kusů. Nejpoužívanějším materiálem pro formy je ocel. Části, které nejsou v přímém styku s roztaveným kovem, jsou vyrobeny z méně kvalitních ocelí než například samotná forma. Forma musí odolávat značně vyšší teplotě a opotřebení než části, které formu pouze stlačují.<sup>3</sup>

Materiály vhodné pro práci za tepla při stejné tvrdosti (tvrdost po zakalení 49-53 HRC) a zároveň s dobrou odolností proti popouštění a opotřebení jsou například W.Nr. 1.2343 nebo W.Nr 1.2885. Využívány jsou především pro formy na tlakové lití lehkých kovů. Vyznačují se svou houževnatostí, ale i těžkou obrobiteľností. ČSN označují tyto oceli jako oceli třídy 19, což vyžaduje kvalitnější dražší nástroje než například pro opracování běžné konstrukční oceli.<sup>4</sup>

Materiály tvrdosti 43-70 HRC je možno obrábět řadou nástrojů s VBD, jako například Cermety, Řeznou keramikou nebo povlakovanými slinutými karbidy. Řezné materiály musí splňovat kritéria jako je vysoká tvrdost, odolnost proti rázům nebo tepelná vodivost. Nejběžnější používané materiál pro obrábění jsou povlakované slinuté karbidy z důvodu nízké ceny a dobrých mechanických vlastností.<sup>6</sup>

## **2.3 Návrh výrobního stroje**

V mé bakalářské práci jsem se zabýval frézováním chladících drážek na rotačním dílci (formě). Volba stroje byla omezena velikostí průměru formy, kde upínací část činila 360 mm. Vhodné stroje pro výrobu byly čtyř osá CNC frézka, Elektrojiskrové obrábění, Soustružnicko-frézovací centrum nebo pěti osá CNC frézka.

### **Čtyř osá CNC frézka**

První navrženou volbou byla čtyř osá CNC frézka, kde díky ose rotace mohla být drážka vyrobena. Upnutí do Dělicího přístroje se vyrábí běžně do průměru 350 mm. V mém případě formy byl průměr vyšší. Z tohoto důvodu by bylo nutné mít speciální vyrobený dělicí přístroj. Další problematickou částí při obrábění ve 4 osách je úhel mezi nástrojem a obrobkem blíže rozebrán v bodě 3. 1. 1 Ze zmíněných důvodů metodu považuji až za krajní volbu výroby.

### **Elektrojiskrové obrábění**

Elektrojiskrové obrábění funguje na principu, kdy je materiál „hlouben“ sérií řízených výbojů. V případě využití Elektrojiskrové metody obrábění je nutné mít funkční čtvrtou osu (osu rotace). Z důvodu velikosti drážek by byla doba výroby a následná cena příliš vysoká, proto metodu doporučuji pouze v krajních případech, kdy nebude možná výroba na jiných zmíněných strojích nebo u externího výrobce.

### **Soustružnicko-frézovací centrum**

Využití centra by přinášelo možnost obrábět průměry i vyšší, než je 1 000 mm. Pro obrábění formy je tedy vhodnou volbou, díky možnosti výměny velikosti kusů. Výrobu lze uskutečnit na



jedno upnutí a není nutné upínat součást při renovaci zvlášť na soustruh a poté na CNC frézku. Flexibilitou stroje se může navýšit výrobní kapacita. Nutností jsou speciálně vyrobené frézy s delší řeznou částí, aby bylo možné formu obrobit. Ve středu frézy vzniká nulová řezná rychlost, která má negativní vliv na nástroj a obrobek. Negativní vliv je podrobněji popsáno v bodě 3.1.1.

## **Pěti osá CNC frézka**

Nejvhodnější volbou pro obrobení se jeví pěti osá CNC frézka z důvodu flexibilního natáčení a naklápění formy. Díky možnosti naklápění formy během řezného procesu nevzniká nulová řezná rychlost ve středu nástroje a nejsou nutné prodloužené nástroje pro opracování. Vyfrézované drážky mají konstantní hloubku s vysokou jakostí povrchu po celé obrobené délce.

## **2.4 Volba upnutí**

Volba upnutí tvoří důležitou součást výroby. Upnutí musí být pevné, aby se zamezilo vzniku případných vibrací, a zároveň nesmí zanechat stopy v obráběném materiálu například vytlačené stopy.

V mém případě bylo upnutí složité, protože se forma obráběla po celém jejím obvodu, a tudíž ji nešlo efektivně a jednoduše upnout pomocí upínek. Dalším úskalím byla hmotnost formy, která činila 58.5 kg. Při naklopení stolu se tato hmotnost rozložila pouze mezi 2 upínky, což mohlo vést k poškození obráběného materiálu (otlačení).

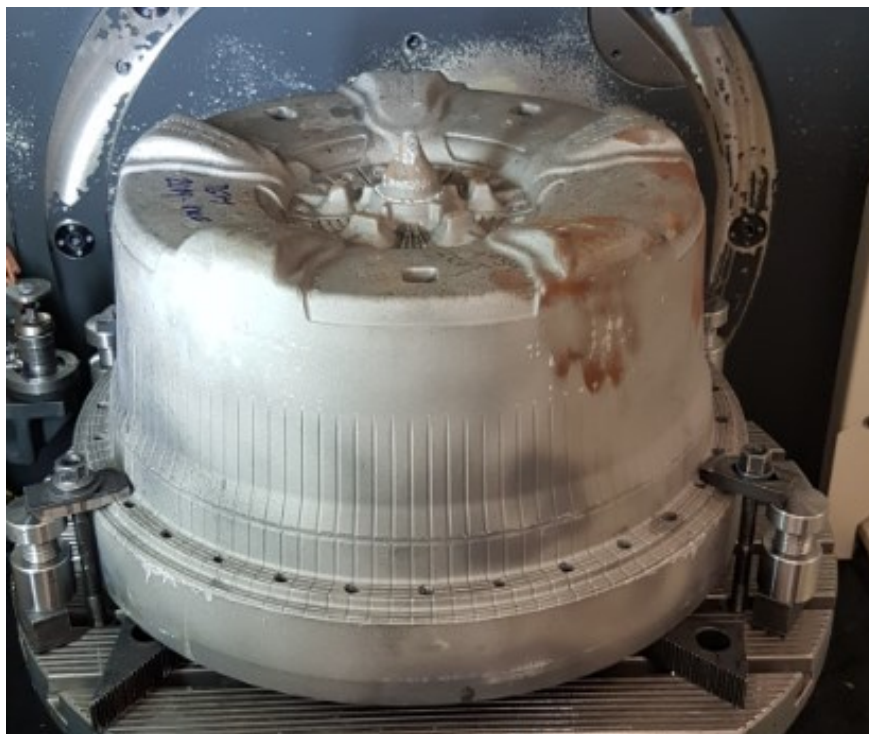
Níže jsou uvedeny možnosti upnutí, které lze zvolit:

- upnutí z vnější strany pomocí upínek,
- upnutí přes střed pomocí upínky s ukotvením,
- upnutí pomocí přípravku.

## Upnutí z vnější strany pomocí upínek

První metodou upnutí formy bylo pomocí vnějších upínek, viz. Obrázek č.3. Upnutí se volilo z důvodu odzkoušení programu a pro případnou opravu vzniklých problémů a také vzhledem k jednoduchosti a dostačující efektivitě při zkušebním frézování drážek. Z hlediska výroby nebylo efektivní, protože při frézování by se musely upínky přestavovat. Upínky by se musely přestavit z důvodu nutnosti obrobít formu po celém jejím obvodu. Vznikla zde možnost otláčení materiálu formy, kdy při naklopeném stole forma převážně zatěžovala pouze dvě upínky, a to celou svojí hmotností.

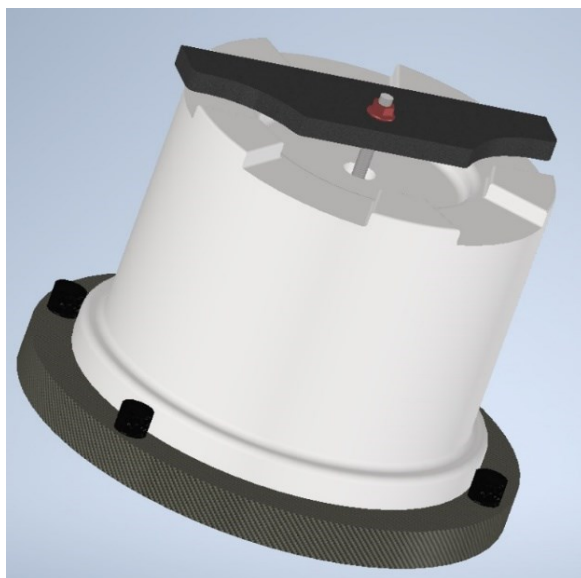
Principem upnutí byl upínací šroub s maticí. Matice má hlavu ve tvaru T – drážky. Stejně profily T-drážek byly vyrobeny ve stole frézky. Přitahováním matice se dotlačila upínka na materiál s opěrkou a tím se soustava sevřela.



Obrázek č. 3 – Způsob upnutí obrobku

## Upnutí přes střed pomocí upínky s ukotvením

Efektivnější volbou upnutí by mohlo být jednou velkou upínkou přes středový otvor formy. Středový trn lze z formy odstranit a díky tomu je možné přes otvor upínka protáhnout. Vzhledem k velikosti a hmotnosti formy je zapotřebí k dostatečnému upnutí využít navíc dorazové čepy. Jedná se o stavitelné čepy, které je možno připevnit ke stolu frézky, aby zamezily pohybu formy. Metoda upnutí je efektivní při výrobě, kdy při výměně formy stačí uvolnit upínku a 2 stavitelné čepy. Druhé dva čepy budou sloužit jako dorazy pro další formu, což povede k vymezení místa a úspoře času. Při takto zvoleném upnutí s dorazovými čepy odpadá možná starost s otláčením materiálu formy.



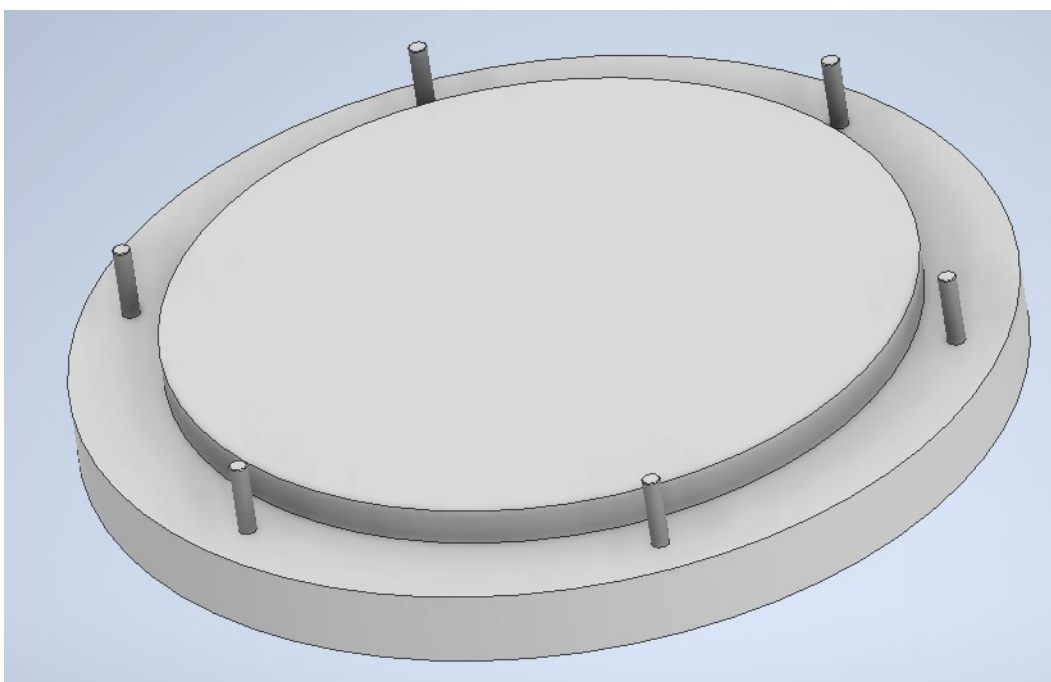
Obrázek č. 4 – Upnutí s dorazovými čepy

## Upnutí pomocí přípravku – desky

Jednou z dalších metod upnutí je pomocí desky. Výroba přináší prvotní výdaje za cenu pohodlnosti a jednoduchosti. Přípravek funguje na principu nasazení formy na vyrobenou desku. V desce jsou otvory se závity s roztečí, jakou mají zahloubené otvory po obvodu formy. Středový průměr desky odpovídá vnitřnímu průměru formy, čímž je vymezena poloha. K utáhnutí se protahují upravené šrouby zahloubenými otvory po bocích formy a následně

přišroubují k desce. Šrouby musí mít upravené hlavy, aby zapadly do záhlubů. Dosedací deska je upnut ke stolu pomocí upínek.

Zmíněná metoda je velmi efektivní, ale cenově náročná na výrobu. Nevýhoda tohoto upnutí spočívá v pevně daných roztečích kolíkových děr a velikosti středového průměru, který není možné variabilně měnit v závislosti na velikosti formy. Možným řešením ceny je navařit kruhovou dosedací část na ocelové nosníky.

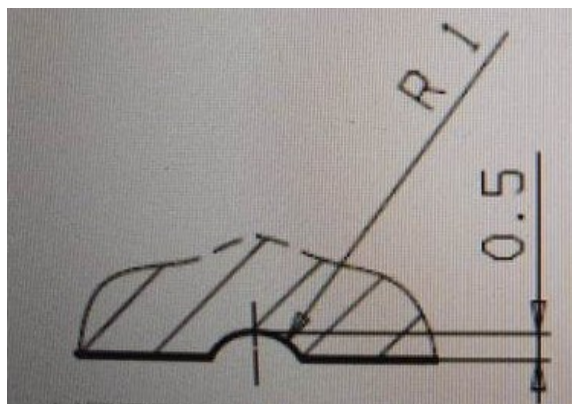


Obrázek č. 5 – Přípravek na upnutí

## 2.5 Měření drážek

Každé měření je zatíženo chybou. Pro co největší přesnost a eliminaci chyby se měření opakuje. Je nutné za stejných podmínek měření provést alespoň 10x. Díky měřením a určení chyby měření lze určit skutečnou hodnotu.<sup>8</sup>

Měření rádiusů je vždy velmi obtížné. V tomto případě se možnost využitých měřicích zařízení zužuje, jelikož rádius je velmi malého poloměru. Vzhledem k malému rádiusu zde není možné využít digitálních úchylkoměrů nebo rádiusových posuvných měřitek. Jejich rozsah je použitelný až od velikosti  $R = 5 \text{ mm}$ . Nachází se zde přechodová místa, která není možné změřit například metodou průsvitu. Tato situace vede ke zvolení kombinace měření pomocí metody průsvitu a obrobkové sondy. Uvedenými metodami jsme schopni změřit veškeré potřebné části chladicí drážky. Rádius drážky je s přesností  $\pm 0,1 \text{ mm}$ . Při velikosti drážky  $R = 1 \text{ mm}$ , kterou můžete vidět na Obrázku č. 6, je dostačující tolerance a nemusí být využity speciální měřicí přístroje.



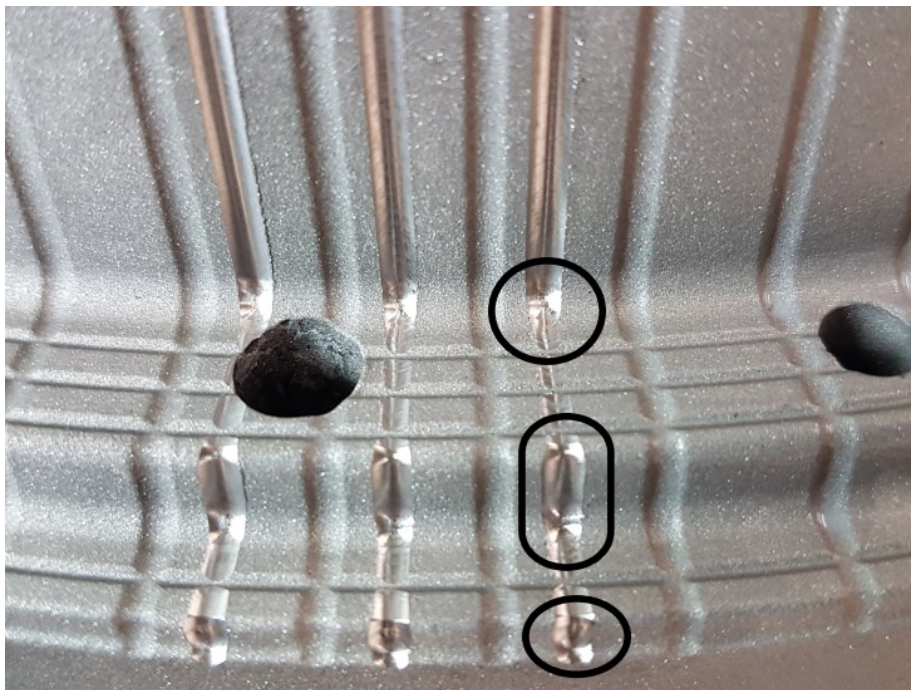
Obrázek č. 6 – Frézovaná drážka

### 2.5.1 Porovnávání pomocí rádiusové šablony

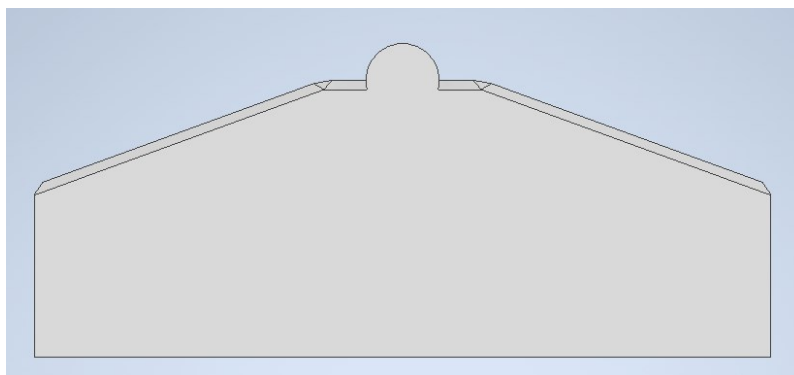
Rádiusové měrky usnadňují kontrolování rozměrů. Jejich hlavní výhodou je jednoduchost provedení a použití. Měření metodou průsvitu je v technické praxi hojně využívaným způsobem měření úhlů, rádiusů nebo rovinností ploch. Jedná se pouze o měření orientační a nezjistí se tím přesná hodnota (rozměr).<sup>9</sup>

Metoda průsvitu je založena na přiložení kalibrované měrky k měřenému místu. Pomocí odhadu obsluha stanoví, zda drážka vyhovuje nebo nevyhovuje. Metoda probíhá přiložením měrky k drážce, kdy „zobáček“ šablony zapadne do drážky. Šablonu ukazuje Obrázek č. 8. Následně je možno vidět hloubku drážky. Při nedostatečné hloubce nezapadá do drážky „zobáček“ celý. V případě hlubší drážky prosvítá kolem „zobáčku“ světlo. Velká nevýhoda

spočívá v nemožnosti změřit veškerá místa drážek. Na formě se nacházejí kritická místa tvořená přechody. Na kritické části upozorňuje Obrázek č. 7. Tyto části metodou průsvitu měřit nelze, a proto je důležité měření doplnit jiným alternativním měřením.



Obrázek č. 7 – Kritická místa



Obrázek č. 8 – Rádusová šablona

### **2.5.2 Měření pomocí obrobkové sondy**

Měření pomocí obrobkové sondy je vhodnější, ale zdlouhavější možností měření. Existuje možnost naprogramovat ji v automatickém cyklu přímo na stroji. V případě nesrovnalostí je možné jednoduše odchylku opravit. Díky tomu odpadá čas, kdy je sonda ovládána ručně operátorem stroje. Metoda měření není pouze porovnávací. Při měření jsou zobrazeny rozměry, které lze vyhodnotit. Pro měření je vyžadován dotek o menším průměru, než je velikost vyráběného rádiusu.

#### **Princip metody:**

Obrobková sonda začíná v klidovém stavu, kdy je snímací hrot pomocí posuvů dopraven k měřicímu místu. Při kontaktu formy se snímacím hrotem dochází k vychýlení z klidového stavu. Při vychýlení doteku dochází k rozpojení elektrických kontaktů, které vydávají signál mechanismu. Mechanismus obrobkové sondy poté zastaví pohyb a odjíždí do výchozí polohy před materiál. Po ukončení měření se sonda vrací do bodu výměny nástroje.<sup>10</sup>

### **2.5.3 Souřadnicový měřicí stroj**

Alternativní metodou měření drážek je měření na Souřadnicovém měřicím stroji. Možnost je navržena z důvodu obtížného měření chladicích drážek. Výhodou je možnost měření složitých součástí. Výsledek měření je zaznamenán do měřicího protokolu, který je k výrobku přiložen.

Měření na souřadnicových měřicích strojích je založeno na vhodném stanovení základního bodu v prostoru a poloh ostatních bodů. Pohyb je uskutečňován v souřadném systému X, Y a Z. Výhodou této metody měření je možnost stanovení základního bodu v prostoru.<sup>10</sup>





Obrázek č. 9 – Portálový souřadnicový měřicí přístroj

V mém případě byl použit souřadnicový měřicí přístroj od firmy Wenzel s označením Wenzel LH 65 - X3 Premium. Nosnost granitové desky je 500 kg a měřicí prostor v ose X= 650 mm, Y= 1000 mm a Z= 500 mm. Zkušebně bylo změřeno 5 vyrobených drážek po vyfrézování na stroji viz. Obrázek č. 9.

## 2.6 Problematiky výroby

Při obtížné a časově náročné výrobě na čtyř osé CNC frézce se přechází k výrobě na pěti osé. Výroba na pěti osé CNC frézce přináší usnadnění při procesu obrábění. Upínání díky možnosti naklápět a natáčet obrobek (případně nástroje) se kladně projeví na výrobním čase, kdy není potřeba složitého upnutí. Označená místa na Obrázku č. 7 značí přechody, se kterými byl při výrobě problém. Z důvodu náročné výroby chladicích drážek na těle formy se i v tomto případě přešlo k pěti osé CNC frézce. Velký problém představuje opracování přechodových částí drážky. V označených místech se forma musí plynule natáčet, aby nedocházelo ke změně hloubky drážky. Za předpokladu, že by zůstala konstantní hloubku a nezměnil se náklon mezi frézou a formou, ale pouze se natočila forma o úhel  $30^\circ$  docházelo by k vyššímu prohloubení



drážky v označených místech na Obrázku č. 7 než tolerance dovoluje. Negativně by proces ovlivnil i frézu, kdy ve středu nástroje dojde k nulové řezné rychlosti, čímž se sníží její životnost

### 3. Návrh technologie výroby

Třetí kapitola se zabývá návrhem technologie výroby. Volba stroje je první z trojice obráběcí soustavy stroj – nástroj – obrobek. Stroj se volí s ohledem na volbu technologie, možnosti stroje nebo například rozměry formy. V mém případě bylo nutné zvolit stroj, který plynule pracuje v pěti osách zároveň. Z tohoto důvodu byl zvolen stroj DMU 50 – DMG MORI. V dalším bodu je rozebrána technologie pěti osého frézování, a především naklápění nástroje při samotném řezném procesu s pozitivním vlivem na nástroj i obrobek. Následující část se zabývá volbou řezného nástroje, kde volím kombinaci hrubovací a dokončovací frézy. Pro nástroje jsem vypočetl řezné podmínky a parametry. Závěrem kapitoly je zmínka o trvanlivost a životnost nástroje a v poslední řadě metoda měření chladících drážek na vnější straně formy.

#### 3.1 Volba stroje

Výroba a renovace byla prováděna na stroji DMU 50 – DMG MORI, což je univerzální CNC frézka s rotačním stolem. Tento stroj byl zvolen z důvodu nutnosti obrábění v pěti osách současně. Jedná se o 3. generaci tohoto stroje a je nabízen v různých variantách. Zvolená varianta stroje je popsána blíže v Tabulce č. 2.

Práce na pěti osé CNC frézce byla nejjednodušší z možných výrobních metod. Její nespornou výhodou je naprostá flexibilita a pohodlnost výroby díky funkčním pěti osám, které mohou pracovat souběžně. Díky tomu často není potřeba namáhavého vymýšlení přípravků na upnutí a případné pootočení nebo více upínání, aby součást byla vyrobitelná

Tabulka č. 2 – Technické parametry stroje

Stroj DMG_DMC50/ 5-osé frézovací centrum s výkyvným stolem	Parametr/ Popis
Řídicí systém	Heidenhain iTNC530 HSCI
Rozměr otočného stolu	D630x500 mm
Středový otvor/rozměr	30H6
Maximální výška obrobku	300 mm
Nosnost stolu	300 kg
Rozjezd osa "X"	500 mm
Rozjezd osa "Y"	450 mm
Rozjezd osa "Z"	400 mm
Rotační osa "C"/rozsah	360°
Naklápěcí osa "B"/rozsah	-5 až +110°
Rozsah otáček	20 000/min. <sup>-1</sup>
Výkon na vřetení;40/100% zátěž	35/25kW
Maximální kroutící moment/ maximální závitník M20	87Nm/130Nm
Počet nástrojů v zásobníku	16
Maximální délka nástroje	300 mm
Maximální průměr nástroje	130 mm
Rychloposuv	24 000 mm/min. <sup>-1</sup>

Díky dostupnosti byl tento stroj naprosto vyhovujícím pro veškeré účely výroby a renovace. Při obrábění byly současně použity osy Z, X, B a případně osa C. Osa Y je stejně jako osa X a Z lineární, ale v tomto případě osa Y držela osu obrobku. Osa B sloužila k naklápění stolu a osa C sloužila k rotaci stolu s formou. Díky pěti osám je možné obrábět 5 stran obrobku na jedno upnutí.



Obr. č. 10 – DMU 50

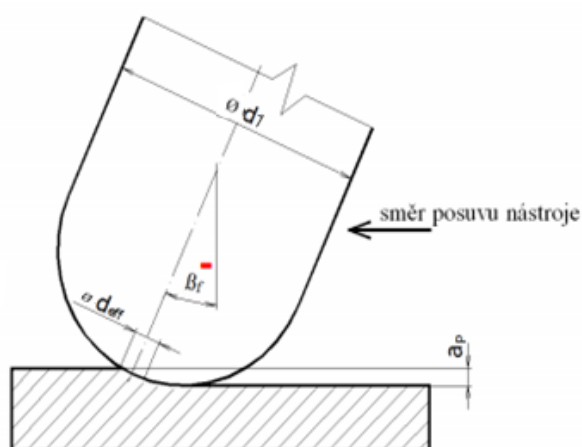
### 3.1.1 Strategie pěti osého frézování na CNC

Pokud jsou frézovány složitější tvary, je zapotřebí využít naklápění nástroje/stolu případně indexování čili přidavných os B (osa rotace) a C (osa natočení) nebo jejich kombinaci. Díky naklápění nástrojů se rovněž zvyšuje efektivní průměr  $d_{\text{eff}}$ . Nedochází tak k nežádoucím účinkům, jak tomu je, když kulová fréza a materiál svírají pravý úhel. V případě svírání pravého úhlu mezi obrobkem a nástrojem dochází k nulové řezné rychlosti ve středu nástroje.

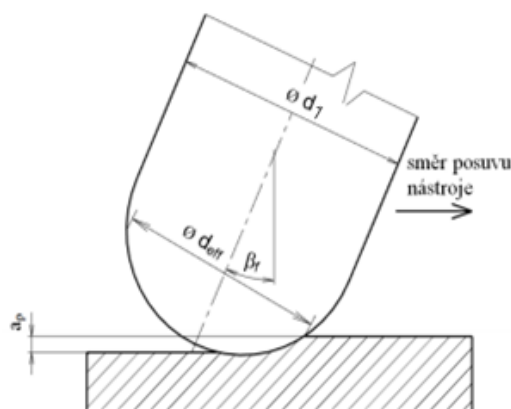
Náklon kolmý na směr posuvu vyvolává útlum samobuzených kmitů. Sklon nástroje má tedy stabilizující účinky díky efektivnímu tlumení samobuzeného kmitání svojí příznivou směrovou orientací, při které v nástroji převládají tahové síly. Vliv sklonu nástroje je

rozhodující, neboť při malém poloměru je soustředěna téměř veškerá prostorová poddajnost řetězce „toku síly“ od nástroje k formě.<sup>12</sup>

Nástroje mohou obrábět ve 3 polohách. První polohou je nástroj kolmý na materiál. Druhou polohou je nástroj tlačенý, který můžete vidět na Obrázku č. 11. Velkou výhodou této metody oproti taženému nástroji zobrazeném na Obrázku č. 12, je tichost chodu a dosažení vyšší kvality obrobeneho povrchu. Třetí metoda pro polohování nástroje, je již zmíněný nástroj tažený. Tažený nástroj se využívá především v případech, kdy není možné využít nástroj tlačенý.



Obrázek č. 11<sup>11</sup> – Tlačенý nástroj



Obrázek č. 12<sup>11</sup> – Tažený nástroj

$\text{Ø}d_1 = d_1$  – funkční průměr frézy [mm]

$\text{Ø}d_{\text{eff}}$  – efektivní průměr frézy [mm]

$a_p$  – hloubka řezu [mm]

$\beta_f$  – úhel náklonu nástroje [°]

### Frézování s nástrojem kolmým na materiál

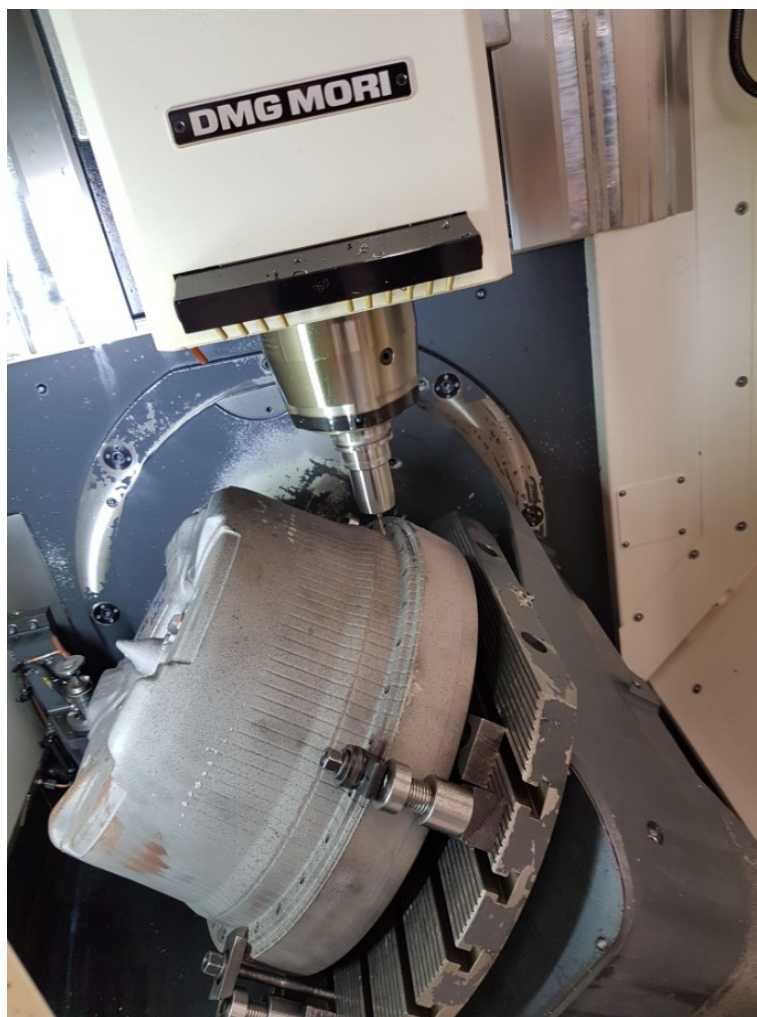
Frézování kulovou frézou standardním způsobem, kdy je úhel mezi nástrojem a obráběnou plochou 90° má velkou nevýhodu. Nevýhoda metody spočívá v nulové řezné rychlosti ve středu nástroje, dále také v narůstající teplotě v místě řezu, pěchování třísky a zvýšenou tvorbou

nárůstků na nástroji. Veškeré tyto nevýhody mají negativní vliv na řezný proces. Snižuje se trvanlivost nástroje a kvalita obrobené plochy.

### **Frézování s naklápěním osy nástroje při řezném procesu**

Při frézování s naklápěním osy nástroje se rozlišuje nástroj tažený a tlačенý. Při metodě tlačенého nástroje se značně eliminuje nebo úplně odstraní nevýhody, které vznikají při frézování kulovou frézou s úhlem  $90^\circ$  vůči obrobku. Díky naklápění nástrojů se kromě zvýšení efektivního průměru zvedá také řezná rychlost a zlepšuje se jakost povrchu. To vše vede k úspoře času a snížení opotřebení nástroje. Některé části nejdou vyrobit bez kombinací metody taženého a tlačенého nástroje. Z tohoto důvodu se využívají obě metody, ale preferovaná je metoda tlačенého nástroje. Úhel naklopení nástroje vůči obrobku je uváděn v rozmezí  $10-30^\circ$  s doporučením, že nejvhodnější úhel pro obrábění je okolo  $15^\circ$ .<sup>12,13</sup>

V méj bakalářské práci jsem volil pro opracování drážek směr posuvu nástroje tlačенého. Metodou se dosáhlo nejvyšší efektivity při řezném procesu. Bylo zde patrné nižší opotřebení nástroje a díky tomu vyšší hospodárnost celého procesu. Dalším pozitivem byla plynulost procesu, kdy při kombinaci metody nástroje taženého a tlačенého by docházelo k prodlevám při natáčení nástroje. Řezný proces byl znázorněn na Obrázku č. 13.



Obrázek č. 13 – Naklopení a natočení stolu při obrábění

### 3.2 Zvolené upnutí

Zvolené upnutí při prvním obrábění bylo pomocí upínek na vnější straně formy, což je znázorněno na Obrázku č. 13. Upnutí bylo zvoleno z důvodu jednoduchosti a rychlosti. Jednalo se pouze o zkušební obrábění, u kterého nebylo nutné mít celý obvod volný. Upnutí není ideální za předpokladu, že bychom chtěli frézovat po celém obvodu formy.

Pro výrobu nebo renovaci po celém obvodu formy bych zvolil upnutí pomocí upínky přes střed s ukotvením viz. Obrázek č.4. Upnutí je pro malé množství kusů dostatečné. Není náročné, a kromě upínky není potřeba vyrobít speciální přípravky.

Druhá varianta upnutí by byla pomocí vnějších upínek, kde je nevýhodou zdlouhavé přestavení upínek. Tato metoda by se volila pouze za předpokladu renovace velmi malého počtu kusů. Jedná se o časově náročnou operaci, kdy omezením je velikost pracovního prostoru. S menšími kusy zde není problém, ale pokud bychom chtěli renovovat formu větší, než je aktuální průměr 17", musíme formu přesně vystředit. Stroj je omezen svým pracovním prostorem na výrobu maximální velikosti pro kola o průměru 18", což je 457,2 mm. Při volbě většího kusu není dostatek prostoru pro nástroj, a proto nebude možné kus obrobit. Nástroje v tomto případě není potřeba měnit i za předpokladu, že by byla výměna formy potřeba za menší či větší kus.

Hlavní změnou zde bude program pro frézování drážek. Se zvyšujícím se průměrem a délkou formy počet chladících drážek a jejich délka roste a naopak, se zmenšujícím se průměrem počet drážek bude klesat a drážky se budou zkracovat. Změna velikostí a počtu drážek vedla k nutnosti vytvořit speciální program na každou velikost formy.

### **3.3 Volba nástroje a řezných podmínek**

V mém případě nebylo možné využít VBD pro obrobení malého poloměru drážky, na který zatím nejsou výrobci schopni nástroje pro VBD vyrobit. Při volbě nástroje bylo uvažováno s tvrdostí převyšující tvrdost obráběného materiálu o 5-6 HRC. Bylo tedy nutné přistoupit k monolitnímu nástroji s PVD povlakem.

Používání povlakovaných fréz metodou PVD s jádrem z jemnozrnného slinutého karbidu je stále oblíbenější. Povlak je vyroben pomocí nanášení odpařením z pevné fáze za teplot až 500 °C a při tlaku 0,1 – 10 Pa ve vakuové komoře. Nástroje jsou určeny až do tvrdosti 70 HRC, kdy rychlost povlakování je udávána v rozmezí 1-10 nm za minutu. Tloušťka vrstvy povlaku se odvíjí od účelu nástroje. Rozmezí je uváděno 1-8 µm. Frézy s PVD povlaky jsou vyráběny ve

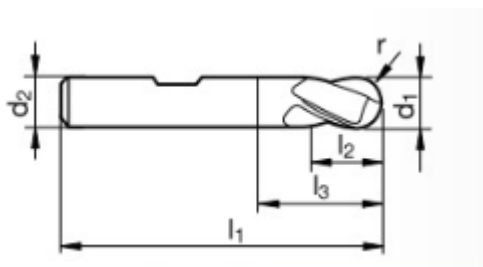


dvou běžných verzích a jedné speciální variantě tří břitů frézy, která je dostupná pouze na objednání. Běžně dostupné jsou dvou a čtyř břitě frézy.<sup>6</sup>

K výrobě chladících drážek byly použity monolitní frézy od firmy Gühring. Firma Gühring speciálně vytvořila povlaky s názvem Fire. Jedná se o PVD povlak TiAlN, který zabraňuje přehřívání nástroje. Tvrdost povlaků se uvádí 2300 HV. Nástroje s povlaky Fire jsou určeny pro obrábění tvrdých materiálů.<sup>14</sup>

## Hrubovací fréza

Katalogové značení: 19968-2



Obrázek č. 14 – Schéma frézy<sup>14</sup>

Kde:

$d_1$  – funkční průměr frézy [mm]

$d_2$  – průměr upínací části [mm]

$l_1$  – délka nástroje [mm]

$l_2$  – délka výbrusu [mm]

$l_3$  – funkční délka [mm]

$r$  – rádius [mm]

Hrubovací frézu bylo nutné využít především z důvodu renovace chladících drážek. Při výrobě nového kusu, byl materiál bez větších odchylek od rovinnosti, zatímco při renovaci, která byla prováděna zavařením drážek zde mohly vzniknout odchylky. Odchylky byly v podobě „kráterů“, které nebyly pravidelné, avšak mohou být po celé délce navařené housenky. „Krátery“ měly za následek přerušovaný řez, který vedl k mnohem vyššímu opotřebení nástroje. Z tohoto důvodu byla zvolena kromě hrubovací frézy i fréza dokončovací. Hrubovací fréza byla určena pro větší odběr materiálu. Dokončovací fréza se volila vzhledem ke zvýšení geometrické přesnosti a jakosti povrchu. Parametry použité frézy jsou uvedeny v Tabulce č. 3.

Tabulka č. – 3 – Hrubovací fréza

$d_1$ e8 [mm]	$d_2$ h6 [mm]	$l_1$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$r$ [mm]	$z$ [-]
2,000	4,000	40,000	6,000	9,400	1,000	2

#### Posuv na zub při hrubování:

(1)

$$f_z = \frac{f_{min}}{z \cdot n} = \frac{950}{2 \cdot 9500} = 0,05 [mm]$$

Kde:

$f_z$  – posuv na zub [mm]

$f_{min}$  – posuv [mm]

$z$  – počet zubů [-]

$n$  – otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]

### Hloubka řezu

(2)

$$a_p = f_z \cdot d_1 = 0,05 \cdot 4 = 0,2 \text{ [mm]}$$

Kde:

$a_p$  – hloubka řezu [mm]

$d_1$  – funkční průměr frézy [mm]

### Řezná rychlost

(3)

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 4 \cdot 9500}{1000} \doteq 120 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

Kde:

$n$  – otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]

$v_c$  – řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

### Otáčky vřetene

(4)

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d_1} = \frac{120 \cdot 1000}{\pi \cdot 4} \doteq 9\,500 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

Tabulka č. – 4 – Řezné podmínky pro část hrubování

Řezné podmínky pro část hrubování		
Řezné parametry	Označení	Hodnoty
Posuv [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$f_{\text{min}}$	950
Posuv na zub [mm]	$f_z$	0,05
Otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]	n	9 500
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$v_c$	120
Posuv pro příjezd/odjezd [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$s_o$	12 500
Hloubka řezu [mm]	$a_p$	0,2

## Dokončovací fréza

Katalogové značení: 5533-4

Posuv na zub při dokončování:

Dokončovací fréza byla použita z důvodu geometrické a rozměrové tolerance pouze pro odstranění zbytkového materiálu, který odpovídal velikosti 0,1 mm. Výhodou bylo zlepšení kvality povrchu. Parametry použité frézy jsou uvedeny v Tabulce č. 5.

Tabulka č. – 5 – Dokončovací fréza

$d_1$ h10 [mm]	$d_2$ h6 [mm]	$l_1$ [mm]	$l_1$ [mm]	$l_3$ [mm]	r [mm]	z [-]
4,000	6,000	57,000	8,000	13,400	1,000	2

**Posuv na zub při hrubování:**

(5)

$$f_z = \frac{f_{min}}{z \cdot n} = \frac{950}{2 \cdot 11000} = 0,04 \text{ [mm]}$$

**Hloubka řezu**

(6)

$$a_p = f_z \cdot d_1 = 0,05 \cdot 2 = 0,1 \text{ [mm]}$$

**Řezná rychlost**

(7)

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 4 \cdot 11000}{1000} \doteq 135 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

**Otáčky vřetene**

(8)

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d_1} = \frac{135 \cdot 1000}{\pi \cdot 4} \doteq 11\,000 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

Tabulka č. – 6 – Řezné podmínky pro část dokončování

Řezné podmínky pro část dokončování		
Řezné parametry	Označení	Hodnoty
Posuv [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$f_{\min}$	950
Posuv na zub [mm]	$f_z$	0,04
Otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]	n	11 000
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$v_c$	135
Posuv pro příjezd/odjezd [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$s_o$	12 500
Hloubka řezu [mm]	$a_p$	0,1

### 3.3.1 Řezné podmínky při frézování

#### Hloubka řezu ( $a_p$ )

Šířka záběru ostří se u frézování odvíjí od frézovaného materiálu, řezného materiálu, technologie frézování a případně výkonu stroje. U konstrukčních ocelí se při běžných průměrech hrubovacích nástrojů volí rozsah hloubky záběru ostří 0,5 -20 mm. Při frézování na čisto se nejčastěji udává hloubka 0,1-0,2 mm. Nejnižší doporučená hloubka řezu je 0,05 mm, protože při nižší hodnotě se začíná projevovat poloměr ostří břitů nástroje. Při malé hloubce řezu je možné zvýšit řeznou rychlost  $v_c$ . Díky malé hloubce řezu  $a_p$  je čas potřebný pro přestup tepla z oblasti řezu do třísky kratší a může se tedy zvýšit řezná rychlost, čímž se zvýší efektivita řezného procesu.<sup>15</sup>

#### Řezná rychlost ( $v_c$ )

Řezná rychlost se určuje jako obvodová rychlost na průměru nástroje.<sup>16</sup>

## Posuv

Posuv při frézování se nejčastěji uvádí v hodnotě na zub ( $f_z$ ). Při obrábění by se hodnota  $f_z$  neměla dostat pod 0,05 mm. Monolitní nástroje mají ostří ukončené rádiusem a mohlo by se stát, že by celá plocha nebyla z tohoto důvodu obrobena. Je možné se setkat s posuvem za otáčku ( $f_{ot}$ ) nebo s posuvem v milimetrech za minutu ( $v_f$ ).<sup>16,17</sup>

(9)

$$f_{ot} = f_z \cdot z [mm]$$

$f_{ot}$  – posuv za otáčku [mm]

(10)

$$v_f = f_z \cdot n \cdot z [mm \cdot min^{-1}]$$

## Otáčky vřetene (n)

Počet otáček nástroje, který je upevněn ve vřetení stroje za časovou jednotku (minutu). Volí se podle průměru nástroje a řezné rychlosti v závislosti na obráběném materiálu.<sup>16</sup>

### 3.3.2 Trvanlivost a životnost nástroje

Trvanlivost nástroje je definována jako doba nepřetržité práce, než se nástroj otupí na mez, kdy je nutné nástroj nebo VBD vyměnit. Trvanlivost se udává v minutách a je závislá na řezných podmínkách, především na řezné rychlosti. Dále je ovlivněna obráběným materiálem a materiálem, ze kterého je nástroj vyroben.<sup>18</sup>

Při řezném procesu se nástroj postupně otupí a tím se jeho řezivost snižuje. Otupení břitů je fyzikálně-chemický proces, při kterém dochází k narušení řezné hrany. Tento důsledek se negativně projeví na výrobě, kdy dochází ke zhoršení přesnosti a kvality povrchu, zvyšuje se řezný odpor

a tím narůstá i teplo vzniklé v řezu a v neposlední řadě se zvyšuje chvění nástroje. Je důležité ostřit nástroje pravidelně kontrolovat. V případě VBD je možnost destičku otočit, pokud to destička umožní. Životnost břitu je součet všech trvanlivostí od prvního použití nástroje až do jeho přestření nebo vyřazení.<sup>18</sup>

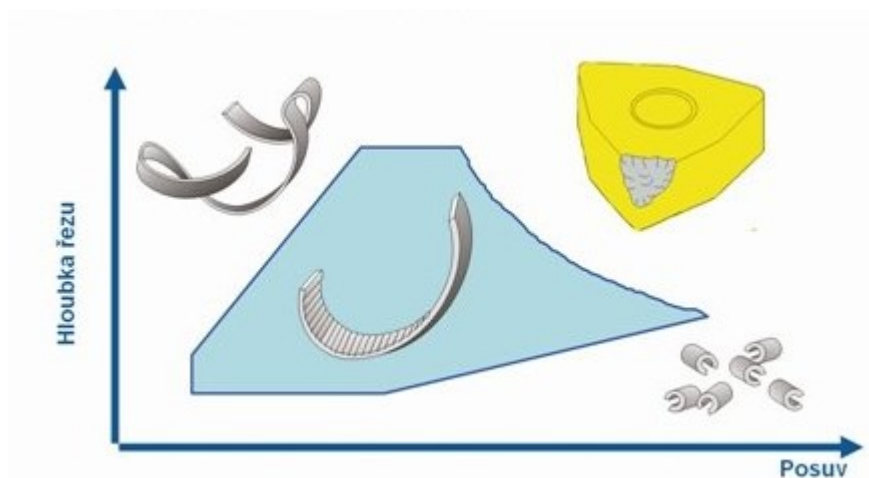
Základní mechanismy opotřebení:

- difúze,
- abraze,
- adheze,
- oxidace,
- plastická deformace,
- křehký lom.<sup>19</sup>

Při třískovém obrábění monolitní kulovou frézou bude s nejvyšší pravděpodobností docházet k otupení nástroje, které povede k vyštípnutí ostří. Otupování je proces, který neustále probíhá v místě kontaktu nástroje s obráběným materiálem. Vyštípnutím ostří dochází k prudkému nárůstu teploty a vibrací v místě řezu. Rapidně klesá životnost nástroje, která má za následek zhoršení jakosti a geometrické přesnosti povrchu.<sup>18</sup>

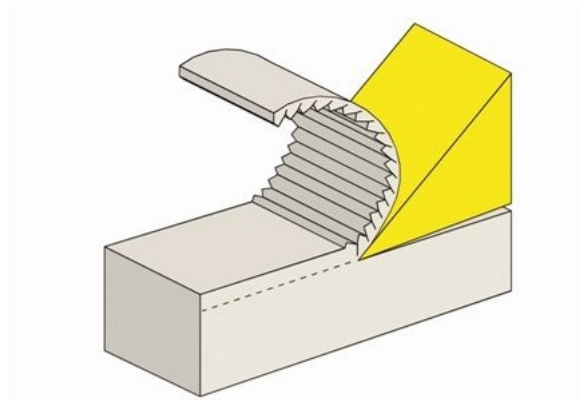
Při procesu obrábění hraje důležitou roli utváření třísky. Správně utvořená tříska při obrábění kalených materiálů by měla být krátká. Krátká tříska odchází nejjednodušeji z řezu a nedochází k poškození obrobku nebo nástroje, jak tomu může být při vzniku velmi krátké třísky. Velmi krátká tříska způsobí mikrotrhliny řezné hrany. Zamezí se případným prostoje stroje z důvodu dlouhé táhlé třísky, která by se mohla namotat na nástroj nebo stroj a poškodit ho.<sup>20</sup>





Obrázek č. 15 - Vliv hloubky řezu a posuvu na třísku<sup>20</sup>

Třísku nejvíce ovlivňuje volba nástroje, volba řezných podmínek, druh obráběného materiálu a v některých případech způsob chlazení. Utváření třísky je ukázáno na Obrázku č. 16. U volby nástroje se musí při tvoření třísky zaměřit především na rádius špičky ostří, úhel čela, úhel řezné hrany a geometrii utvařeče třísky. Tvorbu třísky nejvíce ovlivňují ovšem řezné podmínky. Při správně zvolené kombinaci hloubky řezu a posuvu je zaručena správná tvorba třísky. Při volbě kombinace hloubky řezu a posuvu je možné se řídit teoretickým výpočtem, že hloubka řezu je 10x vyšší než posuv. Jedná se pouze o univerzální pomůcku. Při frézování platí, že čím je vyšší posuv, tím kratší je tříska. Na Obrázku č. 15 je zobrazena kombinace malé hloubky řezu a vysokého posuvu, které vedou ke zkrácení třísky. Naopak dlouhé třísky způsobí vysoký poměr mezi posuvem a hloubkou řezu. Není možné zvolit opak, čímž se myslí nízký poměr. Při nízkém poměru začíná docházet k příliš krátké třísce, které má negativní vliv na životnost nástroje.



Obrázek č. 16 - Utváření třísky v řezném procesu<sup>20</sup>

### **3.4 Metoda měření**

Měření bylo provedeno pomocí obrobkové sondy. Obrobková sonda byla použita pro odstranění případných chyb v programu, které by mohly nastat. Měření bylo přesné a více než dostačující s ohledem na tolerance drážek. Pro efektivní práci bylo možné vytvořit přímo program, který by drážku automaticky měřil.

Měření pomocí obrobkové sondy navrhuji využít u první a poté každé desáté drážky. Ostatní drážky doporučuji měřit pouze pomocí šablony za předpokladu, že budou veškeré chyby odstraněny. Díky tomu by možná chyba mohla nastat pouze v případě, že už bude fréza otupená. Otupení nástroje by vedlo ke snížení jakosti povrchu, a především ke změně rozměrů chladicí drážky.

## 4. Technicko-ekonomické vyhodnocení

Poslední kapitola se zabývá ekonomickým vyhodnocením celého procesu. Je zde uveden strojní čas, který hraje hlavní roli v ceně výroby. Z vypočítaných hodnot je vytvořena kalkulace chladících drážek na vnější straně formy, která je stanovena na jeden kus výrobku. Při vyšším počtu kusů se samozřejmě cena snižuje a celý proces je ekonomičtější. Již zmíněným se také zabývá bod 4.1. V neposlední řadě je nutné započítat vstupní náklady, což v mém případě jsou nástroje, kterými byly chladicí drážky obráběny. Poslední bod se zabývá celkovým ekonomickým vyhodnocením a navržením možných alternativ při výrobě méně kusů, nebo doporučení pro příští výrobu.

### 4.1 Čas výroby nebo renovace chladících drážek

Všechny činnosti, které vedou k výrobě finálního produktu, se vždy projeví na ceně. Do této kategorie se začleňují například časy manipulace, výroby aj. Pro stěžejní ekonomický výsledek proto počítám pouze s výrobním časem.

Čas renovace byl měřen pomocí řídicího systému Heidenhain iTNC530 HSCI. Měření bylo provedeno na pěti drážkách, které byly zavařeny a určeny k renovaci. Čas výroby chladících drážek byl po každé drážce zapsán. Výrobní čas hrál hlavní roli v celkové ceně výroby nebo případné renovaci chladících drážek. Hodinová sazba stroje byla stanovena na 1000 Kč. Konečná cena výroby se odvíjela od počtu drážek, které bylo nutné vyrobit. Při výrobě byl čas na jednu drážku nižší než při renovaci. Forma byla při výrobě přesně vyrobena, a proto zde nebylo nutné počítat s „krátery“, které mohly vzniknout při zavaření drážek u renovace.

Tabulka č. 7 - výrobní časy:

Chladicí drážka	Výrobní čas [min]
1	17,58
2	14,9
3	12,12
4	11,98
5	11,92

První čas byl ze všech nejdelší, z důvodu neustálé kontroly dráhy nástroje, kterou se předcházelo případné kolizi formy s nástrojem nebo strojem. Druhý čas byl kratší, kdy se zkoušely měnit posuvy a otáčky frézy. Při posledních časech nástroj pracoval bez zbytečných prostojů a s minimálním korigováním posuvu. Poslední naměřený čas budu brát jako výrobní čas drážek. Je možno vypočítat cenu výroby renovace těchto pěti obrobených drážek.

Celkový výrobní čas:

(11)

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 =$$

$$T = 17,58 + 14,9 + 12,12 + 11,98 + 11,92 =$$

$$T = 68,5 \text{ min}$$

Kde:

T – celkový výrobní čas

t<sub>1-5</sub> – čas výroby 1. – 5. drážky

Vynásobením výpočtu hodinovou sazbou 1 000 Kč jsem došel k závěru, že cena strojního času pro renovaci pěti drážek stála 1 141,67 Kč. V Tabulce č. 8 je uveden rozdíl mezi první drážkou a následným obráběním. Rozdíl činí téměř 6 minut. Při renovaci vyššího množství

drážek cena klesá v poměru na vyrobenou drážku. Dochází k úspoře času, kdy stroj může obrábět rychlostmi a posuvy, které byly navrženy v technologickém postupem technologem.

Tabulka č. 8 – renovace drážek:

Počet obráběných chladících drážek	Výrobní čas [min]	Výrobní náklady [Kč]
5	68,5	1 141,67
10	128,1	2 135
20	247,3	4 121,67
30	366,5	6 108,33
60	724,1	12 068,33

Z Tabulky č. 8 vyplývá, potřebný strojní čas pro výrobu vypsanych počtu drážek a cena strojního času. K této ceně je nutné připočítat cenu nástrojů a čas pro upínání, pro získání celkové ceny výroby.

## 4.2 Náklady na výrobu a renovaci chladících drážek

Cena výroby a renovace chladících drážek se odvíjí především od jejich počtu. S narůstajícím počtem nebo rozměry drážek průměrná cena na drážku klesá. Hlavní náklady vzniklé při výrobě jsou níže podrobněji rozebrány:

- cena třískového obrábění,
- cena nástrojů,
- příprava výroby a manipulace,
- cena přípravků,
- cena měření,
- cenu na výrobu přípravku,
- přeprava.

## **Příprava výroby a manipulace**

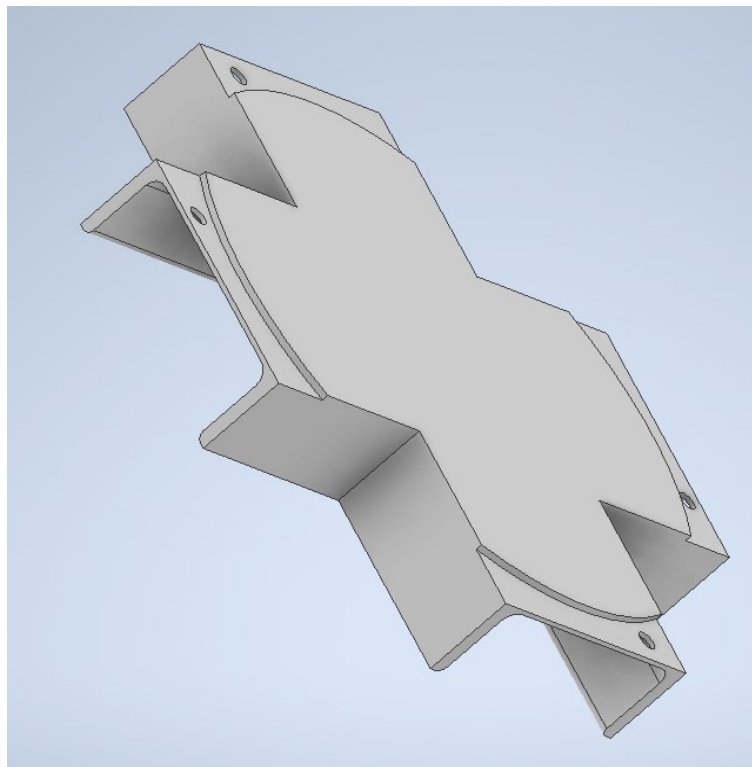
Příprava výroby je nevyhnutelná součást výrobního procesu. Do tohoto času je nutné zahrnout jak přípravu nástrojů, tak jejich zaměření, zanesení do stroje a upnutí formy. Upnutí bylo v případě mé bakalářské práce zdlouhavý a náročný proces. Manipulace vzhledem ke hmotnosti 58,5 kg je nutná pomocí jeřábu. Využití jeřábu prodlouží celou manipulaci, a tak i čas potřebný k upnutí. Veškerý tento čas není produktivní, a proto byla snaha ho omezit na minimum. Jednotlivé upínání je rozebráno v bodě 2.5.

### **4.2.1 Náklady na výrobu přípravku**

Pro budoucí výrobu bych doporučil výrobu přípravku. Použitím přípravku by se značně urychlilo upínání a celková jednoduchost manipulace s formou. Díky snížení těchto aspektů by se vstupní náklady brzy zaplatily. Při nastávající výrobě nebo renovaci by celková výroba byla ekonomičtější. Je nutné zvážit správnou volbu přípravku. Přípravky je možné vyrobit z více kusů a různými metodami.

První možnost výroby je z kulatiny. Pomocí třískového obrábění se upraví průměr, aby odpovídal vnitřnímu průměru formy. Po bocích se vyvrtají otvory, ve kterých bude závit pro dotažení formy k přípravku. Přípravek je zobrazen na Obrázku č. 5.

Alternativní metodou z důvodu vysoké ceny materiálu pro výrobu přípravku je výroba pomocí svařených U profilů. Takto svařený přípravek ve tvaru znaménka “ + “ by byl materiálově úspornější. Po bocích se vyvrtají otvory jako u předchozího přípravku pro upevnění formy. Přípravek by byl ekonomicky nejvýhodnější, a ne příliš náročný na výrobu. Díky U profilům by byla celková hmotnost nižší a zároveň by nastala jednodušší manipulace. Navržený přípravek je zobrazen na Obrázku č. 17.



Obrázek č. 17 - Přípravek z U profilu

Poslední přípravek, který bych navrhl k použití, by byla rádiusová šablona viz Obrázek č. 8. Šablona zjednoduší měření drážek, což se pozitivně projeví na snížení potřebného času pro měření.

### **4.3      Cena a volba nástrojů**

#### **Náklady na nástroje**

Náklady na nástroje se odvíjí podle počtu vyrobených nebo renovovaných drážek. Samozřejmě hraje roli, jaký materiál je obráběn. Od volby materiálu se odvíjí opotřebení břitů nástroje. Frézovací nástroje nabízí více firem. V mém případě byly použity monolitní frézy

s PVD povlakem. Bližší srovnání cen nabízených nástrojů a případné výhody jsou popsány v Tabulce č. 9 a níže.

## Volba nástroje

Volba nástroje pro obrábění je ovlivněna především obráběným materiálem. Podle obráběného materiálu se volí geometrie nástroje, která se liší u každé skupiny materiálů. Dále se volí podle potřebného průměru a délky, případně zda se bude jednat o nástroj monolitní nebo s VBD.

V mé bakalářské práci byly použity pro třískové obrábění dvě frézy. Frézy byly zakoupeny u Německé firmy Gühring. Na trhu je možno vybírat z více nabídek různých fréz. Cenová nabídka několika vhodných fréz je uvedena v Tabulce č. 9 a nástroje jsou popsány a rozebraných níže.

Tabulka č. 9 – Ceny nástrojů

Firma	Cena bez DPH [Kč]
JK-Nástroje	509
Bo-Important	616,2
Gühring – hrubovací fréza	248
– dokončovací fréza	455

První z fréz byla od firmy JK-Nástroje. Jedná se o dvoubřitou kulovou frézu průměru 2 mm. Je určena pro materiály do tvrdosti 70HRC s povlakem TiAlN a jádrem z jemnozrnného tvrdokovu.





Obrázek č. 18 - Kulová fréza<sup>14</sup>

Další z nabízených fréz, která byly uvažována ke koupi, byla od společnosti Bo-important. Jedná se o tvrdokovovou rádiusovou dvoubřitou frézu průměru 2 mm. Je určena pro materiály do tvrdosti 60 HRC a řezné délky 7 mm.

Mnou zvolené frézy byly zakoupeny z důvodu dlouholeté zkušenosti a spokojenosti u firmy Gühring. Výhodou byla nižší pořizovací cena a splnění základních parametrů, které je zapotřebí dodržet. Jedná se o frézy s technickými parametry rozepsanými v bodě 3.3.

## 4.4 Možné zefektivnění výroby

Nejvyšší cenou celé výroby nebo renovace bylo třískové obrábění. Pro výpočet jsem stanovil hodinovou sazbu stroje na 1000 Kč. Výroba tvarových forem je složitým a zdlouhavým procesem, který je finančně nákladný. Z důvodu vysoké výrobní ceny je vždy snaha najít alternativní řešení, která budou odpovídat požadované kvalitě za nižší cenu. Nižší ceny lze dosáhnout mnoha způsoby, jako například správnou volbou stroje a nástroje, výrobou přípravku nebo volbou technologie výroby. Volba technologie výroby nejvíce ovlivňuje celý výrobní proces a je možné ušetřit cenný čas. Díky tomu předběhnout možnou konkurenci s lepší cenovou nabídkou.

V mé bakalářské práci byla použita metoda frézování pomocí naklápění nástroje. Tato metoda není běžnou z důvodu vysoké pořizovací ceny stroje. Velkou výhodou této metody je zamezení nulové řezné rychlosti ve středu nástroje. Tato skutečnost má velmi kladný vliv na celý řezný proces, což vede k možnosti vyšších posuvů a také k vyšší životnosti nástroje.

Na životnost nástroje má velký vliv, zda je forma renovována nebo vyráběna. Při výrobě nové formy je dodána s konstantním průměrem a bez větších odchylek. Frézování drážek do plného materiálu je jednodušší. Ušetří se nejen čas, ale také se sníží opotřebení nástroje, který nebude v přerušovaném řezu. Při renovaci dochází před zavařením k osoustružení. Soustružení ale nezaručí celistvost materiálu, a proto je možné se setkat s „krátery“, které budou tvořit přerušovaný řez, při kterém je nástroj náchylnější na vyštípnutí ostří.

Dalším zefektivněním výroby by byla výroba přípravku, kde se celý proces ustavení a upnutí materiálu urychlí. Výhodou by byla i alternativní metoda na úsporu materiálu při výrobě přípravku, kde by se cena výroby snížila. Nevýhodou takto vyrobeného přípravku by bylo, že není univerzální. Při výrobě jiné velikosti formy, která nebude mít stejný středový otvor je nutné vyrobit nový přípravek. Nový přípravek by s sebou nesl další náklady, a proto je dobré zhodnotit, zda se výroba přípravku v dané situaci vyplatí.

Možnost snížení výrobních nákladů je přeostržení fréz. Při řezném procesu se fréza postupem času otupí a může dojít až k vyštípnutí ostří, které je popsáno v bodě 3. 3. 2. Cena dokončovací frézy je téměř poloviční než hrubovací frézy. Přeostržení dokončovací frézy by mohlo přinést úsporu finančních nákladů. Je nutné mít zásobu nástrojů, aby bylo možné vyrábět i přes čas, kdy nástroje budou poslány externí firmě na přeostržení.

## 5. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout výrobu chladících drážek na těle formy. Chladící drážky jsou od sebe posunuty o  $3^\circ$  a po celém obvodu formy je jich vyrobeno 120. Forma byla vyrobena z oceli o tvrdosti 49-53 HRC a hmotnosti 58.5 kg. Pro tvrdé materiály bylo nutné zvolit správné řezné nástroje a řezné podmínky. Při zkušebním obrábění bylo zvoleno upnutí pomocí upínek z vnější strany formy. V rámci příštího obrábění bych změnil technologii upnutí. Upnutí formy pomocí upínek z vnější strany bylo zdlouhavé a při obrábění celé formy by bylo i značně neekonomické. Doporučil bych tedy upnutí pomocí středové upínky a dorazových čepů. Zmíněné upnutí se jeví jako efektivní a zároveň jednoduché. Velkou výhodou je flexibilita, kdy při obrábění formy o jiném rozměru se pouze přestaví dorazové čepy a změni upínka.

Zkušební obrábění formy proběhlo na pěti osé CNC frézce. Výhodou zde byla možnost naklápění stolu během řezného procesu. Naklápění stolu vedlo ke vzniku efektivního úhlu mezi nástrojem a formou. Náklon měl pozitivní vliv na obrobenou plochu a životnost nástroje. Pro frézování byla zvolena fréza hrubovací a dokončovací. Kombinace fréz s PVD povlaky se kladně projevila na geometrii a jakosti povrchu obrobených drážek. Volbou vhodných řezných parametrů vznikala krátká tříska. Metoda průsvitu doplněná o měření obrobkové sondy byla vhodně zvolenou kombinací pro měření chladících drážek.

Výrobní čas chladících drážek klesal při stanovení vhodných řezných parametrů. Při výrobě prvních drážek byl čas pouze orientační. Ve zmíněných časech byly zkoušeny vyšší řezné rychlosti k dosažení efektivnější výroby. Nejeefektivnější částí výroby zůstává volba upnutí, kdy se volba vhodného přípravku jeví jako nejlepší úspora výrobního času.

Drážky se nejčastěji renovují v rozmezí 10 – 40, kdy při vyšším počtu už nemusí být renovace ekonomicky výhodná. V Tabulce č. 10 jsem uvedl cenu výroby drážek s ohledem na nejčastěji renovované množství doplněné o cenu renovace poloviny chladících drážek formy.

Tabulka č. 10 – Cena renovace drážek

Počet renovovaných drážek:	Cena renovace [Kč]
10	2 135
20	4 121,67
30	6 108,33
40	8 095
60	12 068,33

## Zdroje:

- [1] [online]. [cit.2020-4-8]. Dostupné z: <https://www.aluapneu.cz/rozmery-alu-kol>
- [2] ČERVÁŠEK, Jiří. Lití pod tlakem. Vydání první. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953, 208 s.
- [3] [online]. [cit.2020-3-15]. Dostupné z <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1896>
- [4] [online]. [cit.2020-3-27]. Dostupné z <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-kaleny-ch-materialu-reznou-keramikou.html>
- [5] [online]. [cit.2020-3-27]. Dostupné z <http://toolsteel.cz/1-2343-x37crmo5-1-x38crmov5-1-19552/>
- [5] SADÍLEK, Marek a Jaroslav DUBSKÝ. Obrábění I: výběr přednášek. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3857-1.
- [6] [online]. [cit.2020-3-27]. Dostupné z <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>
- [7] [online]. [cit.2020-3-8]. Dostupné z <https://pauly-stahlhandel.com/en/werkstoff-nr/1.2885>
- [8] [online]. [cit.2020-3-26]. Dostupné z <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [9] [online]. [cit.2020-3-8]. Dostupné z <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1896>
- [10] [online]. [cit.2020-4-8]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/productivity-pc-software-k-sondam-pro-obrabeci-centra--6252>
- [11] [online]. [cit.2020-2-17]. [https://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni metody v obrabeni Final.pdf](https://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrabeni_Final.pdf)
- [12] [online]. [cit.2020-2-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/strategie-frezovani-naklopenym-nastrojem.html>
- [13] SADÍLEK, Marek. Výzkum změny polohy osy nástroje při víceosém frézování. Ostrava, 2012. Habilitační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
- [14] [online]. [cit.2020-5-8] Dostupné z : [https://guehring.com/wpcontent/uploads/2018/onlinecatalogue/kataloge-de/index.php?catalog=DE\\_SuperLine\\_2019&startpage=U1](https://guehring.com/wpcontent/uploads/2018/onlinecatalogue/kataloge-de/index.php?catalog=DE_SuperLine_2019&startpage=U1)
- [15] [online]. [cit.2020-3-27]. Dostupné z [http://www.kom.tul.cz/soubory/tob\\_rp.pdf](http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf)

- [16][online]. [cit.2020-3-27]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- [17][online]. [cit.2020-3-27]. Dostupné z <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1238>
- [18] [online]. [cit.2020-3-31]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1204>
- [19] [online]. [cit.2020-3-31]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase.pdf>
- [20] [online]. [cit.2020-4-27]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-rozpoznat-spravne-utvareni-trisek.html>
- [21][online]. [cit.2020-4-27]. Dostupné z: <https://www.vhrousar.cz/flow-3d-cast>